

균일 예혼합 압축 착화 디젤 엔진의 예혼합 조건 변화에 따른 연소 및 배기 특성

김명윤*** · 황석준*** · 김대식** · 이기형* · 이창식†

Effect of Premixing Condition on the Combustion and Emission Characteristics of HCCI Diesel Engine

Myung Yoon Kim***, Seok Jun Hwang***, Dae Sik Kim**, Ki Hyung Lee*, Chang Sik Lee†

ABSTRACT

The purpose of this work is to investigate the effect of premixing condition on the combustion and exhaust emission characteristics in a HCCI diesel engine. To form homogeneous charge before intake manifold, the premixed fuel is injected into premixed tank by GDI injection system and the premixed fuel is ignited by direct injected diesel fuel. But in the case of high intake air temperature, premixed fuel is auto-ignited before diesel combustion and soot emission is increased. In the case of light load condition, the BSFC is improved by intake air heating because increased air temperature promoted the combustion of premixed mixture. NOx and smoke concentration of exhaust emissions are reduced compared to conventional diesel engine. The combustion characteristics of the HCCI diesel engine such as combustion pressure, rate of heat release, and exhaust emission characteristics are discussed.

Key Words : HCCI, Combustion characteristics, Emission characteristics, NOx, Soot, Rate of heat release

기 호 설 명

DI	Direct injected	th	Theoretical
pr	Premixed	act	Actual
ϕ	Equivalence ratio	H _l	Lower heating value
m	Mass	MR	Premixed ratio
T _{in}	Intake air temperature	HCCI	Homogeneous charge
A/F	Air fuel ratio(mass based)		compression Ignition

1. 서 론

균일 예혼합 압축착화(HCCI) 기관은 디젤 기관에 필적하는 높은 열효율을 가짐과 동시에 연

소실 전체에 걸친 저온, 희박 예혼합 연소로 인하여 매우 우수한 배기 특성을 나타내는 것을 알려져 있어 세계 각국의 자동차 업계 및 학계에서 많은 연구가 진행되고 있다. HCCI 기관의 연소는 연소실 내로 공급된 예혼합기가 피스톤의 압축으로 자연 발화하기 때문에 연료의 자발화 특성, 공급 연료의 공간적 분포, 잔류 가스, 혼합기의 균일도, 압축비, 흡기 온도와 같은 많은 인자에 의하여 영향을 받기 때문에 착화의 제어 가 어

* 한양대학교 대학원

** (주) 파라다이스 산업

*** 한양대학교 기계공학부

† 연락처, cslee@hanyang.ac.kr

려운 문제점이 있다[1]. 또한 HCCI 기관의 운전 범위는 예혼합 연료의 당량비가 농후한 경우에는 급격한 연소의 진행으로 노킹이 발생하며 상대적으로 희박한 경우에는 미연 탄화 수소와 CO의 발생이 급격히 증가함과 동시에 연료소비율이 급격히 악화되는 것으로 알려져 있다[2]. 또한 HCCI 기관은 예혼합기의 자착화에 의하여 연소되기 때문에 높은 세탄가를 가진 연료를 연소실에 직접 분사하여 예혼합 연료의 착화를 촉진하는 연구도 진행 중이다[3,4,5]. 이러한 관점에서, 본 연구에서는 기존의 직분식 디젤 기관에 HCCI 개념을 적용하여 균일한 예혼합기를 기존의 직분식 디젤 기관에 공급하여, 연소실 내로 직접 분사되는 디젤 연료의 연소로 균일한 예혼합기의 연소를 촉진시켰다. 또한 예혼합기의 실화에 의한 연료소비율 악화를 방지하기 위하여 흡기 예열장치를 설치하여 예혼합기의 자발화를 촉진시켜 예혼합기의 예혼합 연소를 촉진시켰으며, 흡기 온도가 균일 예혼합 압축 착화 디젤 기관의 연소 및 배기 특성에 미치는 영향에 대하여 실험하였다.

따라서 본 연구에서는 예혼합기 및 직분된 디젤 연료의 공연비, 그리고 흡기 온도가 예혼합 압축 착화 디젤 엔진의 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 흡기 온도, 부하 조건 및 예혼합기 공급 조건을 변경하면서 실험을 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

Table 1 Specifications of test engine

Engine type	4cycle diesel engine
Combustion chamber shape	Toroidal
Number of injector hole	4
Displacement volume	673cm ³
Bore × Stroke	95 × 95 mm
Compression ratio	18 : 1
Number of cylinder	1

본 연구에 사용된 기관은 673cc의 배기량을 가지는 직접 분사식 단기통 디젤기관이며 Table 1은 실험용 기관의 주요 제원을 나타낸 것이다.

Fig. 1은 실험 장치의 계통도를 나타낸 것으로서 디젤 엔진과 동력계 시스템, 예혼합기 공급 및 제어 시스템, 흡기 온도 제어 시스템, 연소 및 배기 분석 시스템으로 구성하였다. 불 균일한 예혼합기에 의한 영향을 없애고 충분히 공기와 예혼합된 혼합기를 형성하기 위하여 엔진의 흡기 포트 상류에 약 9000cm³의 체적을 가지는 예혼합 체임버를 설치하였고 고압의 연료 분사를 위한 GDI 인젝터를 흡기 밸브로부터 약 50cm 거리에 설치하였다. 예혼합 체임버의 직경은 GDI 인젝터로부터 분사된 연료의 벽류를 방지하기 위하여 직경 20cm로 설계하였으며, GDI 인젝터 주위에 금속관을 설치하고 냉각수를 순환시켜 흡기가열에 따른 GDI 인젝터의 과열을 방지하였다. 예혼합 연료는 유니버설 ECU(Motec Research, M8)를 통하여 제어되도록 하였으며 흡기의 가열을 위한 흡기 가열 및 제어장치와 정확한 유량을 측정하기 위한 열선식 유량계(EPI, 8000MP)를 설치하였다. 동력계는 최대 흡수 마력이 75kW인 와전류식 동력계를 사용하였으며, 기관으로부터 배출되는 배기가스의 분석을 위하여 NOx 분석기(Yanaco, BCL-511)와 매연 측정기(DBC-1000), 그리고 HC, CO 가스 분석기(Horiba, MEXA-554JK) 등이 사용되었다. 또한 연소압력을 측정하기 위하여 압전식 압력 센서(Kistler, 6061B)를 연소실에 설치하여 여기서 나오는 압력 신호와 엔진에 설치된 엔코더의 신호를 받아 해당 구간의 연소압력 및 열 발생율을 구하였으며, 본 연구에서는 100 사이클을 평균한 값을 사용하였다.

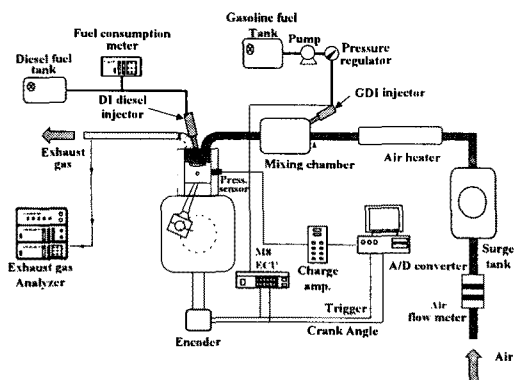


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 실험 조건

본 연구에서는 흡기 온도 및 연료 공급 특성에 따른 HCCI 디젤 엔진의 연소 및 배기 특성을 알기 위하여 Table 2와 같은 조건에서 실험을 수

행하였다.

Table 2 Experimental conditions

Engine speed	1200 rpm
Load	0, 10, 20, 30 Nm
Intake air temp.	20, 50, 80, 120 °C
Cooling water temp.	70 °C
Fuel	Gasoline (premixed) Diesel (DI)
Injection pressure	5.5MPa (premixed) 22MPa (DI)
SOI	TDC (premixed) BTDC 20° (DI)

연소실 전체의 당량비는 연소실에 공급된 예혼합 가솔린 연료와 직접 분사된 디젤 연료의 당량비의 합으로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{total} &= \frac{(F/A)_{act}}{(F/A)_{th}} = (m_{fuel}/m_{air}) \times (A/F)_{th} \\ &= \frac{m_{pre}(A/F)_{th,pre} + m_{DI}(A/F)_{th,DI}}{m_{air}} \quad (1) \end{aligned}$$

또한, 예혼합 연료인 가솔린과 연소실 내로 직접 분사된 디젤 연료의 비율을 나타내기 위하여 총 연료의 공급 열량에 대한 예혼합 가솔린 연료의 열량의 비율을 예혼합율(MR)로 정의하고 다음의 식으로 나타내었다.

$$MR = \frac{m_{pr}H_{l,pr}}{m_{pr}H_{l,pr} + m_{DI}H_{l,DI}} \quad (2)$$

여기서, m_{pr} 는 예혼합 가솔린 연료의 분사량, m_{DI} 는 연소실 내로 분사된 디젤 연료의 분사량, $H_{l,pr}$ 는 가솔린 연료의 저위발열량이고, $H_{l,DI}$ 는 디젤 연료의 저위발열량이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연소 특성

Fig. 2는 흡기온도가 20°C이고 엔진의 부하가 20Nm인 경우의 연소실 내의 연소 압력 및 열발생율을 각각의 예혼합율에 대하여 나타낸 것이며 팔호안은 연소실 전체의 당량비를 계산한 것이다. 예혼합 연료의 공연비가 0인 경우는 기존의 직분식 디젤 기관이며, 이 경우의 열발생율 곡선은 예혼합된 디젤 연료의 연소 지연 후에 발생하는 압축착화에 의해 급격한 열발생율을 보이는 예혼합 연소와 확산연소로 나누어짐을 알 수 있으며 이것은 일반적인 디젤 기관의 연소 특성을

잘 나타내고 있다.

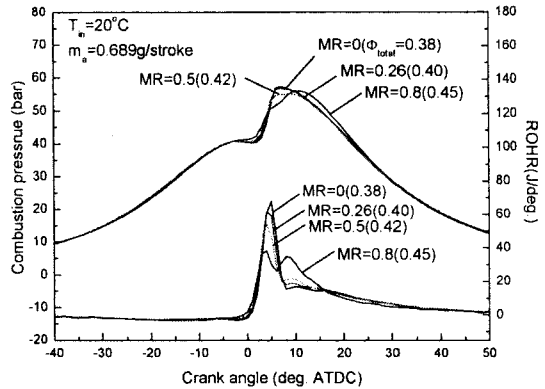


Fig. 2 Combustion characteristics with various premixed ratio ($T_{in}=20^{\circ}\text{C}$, 20Nm load)

Fig. 2의 경우, 엔진의 부하가 일정하기 때문에 예혼합 가솔린 연료의 양이 증가할수록 연소실에 직분되는 디젤 연료의 양은 감소하며 예혼합율이 증가할수록 예혼합된 가솔린 연료의 느린 자발화에 의하여 압력 상승의 시작 시점이 조금씩 진각되는 것을 알 수 있으며, MR=0.8인 경우에는 최고 압력 도달 시점이 지연됨을 알 수 있다. 예혼합 연료의 착화에 영향을 미치는 디젤 연료의 양이 감소됨으로 인하여 압력의 상승이 지연됨을 알 수 있다. 또한 예혼합율이 증가함에 따라 디젤 기관의 예혼합 연소에 해당하는 급격한 열발생율은 감소하는 것을 알 수 있으며, 이것은 연소실내로 분사된 디젤 연료의 양의 감소와 가솔린 연료의 조기 착화에 의한 혼합기 온도 상승에 의한 착화 지연기간의 감소에 의한 것으로 판단된다. 또한 디젤기관의 확산화염 구간에 해당하는

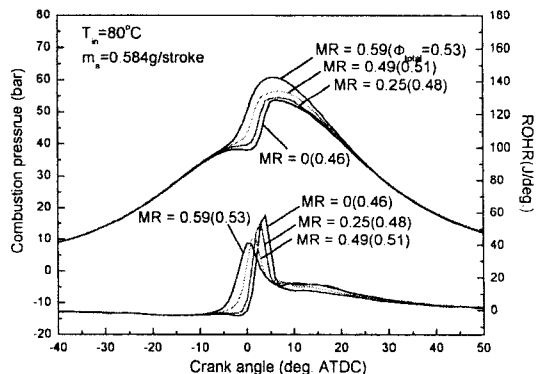


Fig. 3 Combustion characteristics with various premixed ratio ($T_{in}=80^{\circ}\text{C}$, 20Nm load)

는 열발생율은 예혼합비가 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있으며 이는 디젤 연료의 연소에 의하여 예혼합 가솔린 연료의 예혼합 연소가 촉진된 것으로 보인다. 이상의 열발생을 특성으로 볼 때, 예혼합율의 증가는 디젤 연료의 예혼합 연소 및 확산 화염을 감소시켜 NOx 및 Soot의 발생을 저감시킬 수 있음을 예상할 수 있다. Fig. 2의 경우, 예혼합율 0.8 이상에서는 예혼합 가솔린 연료의 착화원이 되는 디젤 연료량의 감소로 인하여 연소불안정성이 증가하여 정상적인 운전이 불가능 하였다.

Fig. 3은 엔진의 부하가 20Nm이고 흡기 온도가 80℃인 경우의 예혼합 연료율의 변화에 따른 연소압력 및 열발생율 곡선을 나타낸 것이다. 이 경우는 흡기온도의 가열에 의해 체적효율이 감소하여 Fig.2의 경우보다 행정당 공기유량은 감소하였으며, 연소실 전체 당량비가 증가한 것을 알 수 있다. 흡기 온도가 20℃인 경우는 앞에서 설명한 바와 같이 예혼합 가솔린 연료의 주된 연소가 디젤 연료의 예혼합 연소 이후에 일어났으나, 흡기 온도가 80℃인 경우는 예혼합 연료율의 증가할수록 예혼합 가솔린 연료의 예혼합 연소가 디젤 연료의 예혼합 연소보다 진각되어 피스톤이 상사점 전에 연소가 일어나서 전체적인 연소압력은 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급한 체적효율이 감소함에 따라 연소실내로 공급된 공기의 양이 감소하여 예혼합 가솔린 연료의 당량비가 증가한 원인과 연소실 내 혼합기의 온도 상승에 따른 예혼합 연소 촉진에 의한 것으로 판단된다. 또한 예혼합율이 증가함에 따라 예혼합 가솔린 연료에 의한 예혼합 균일 연소에 의하여 전체적인 열발생율 곡선은 완만한 경사를 이룸을 알 수 있다. Fig. 3의 경우, 예혼합율의 증가에 따라 디젤 연소의 확산화염 구간은 줄어드는 경향을 보였다.

3.2 배기 특성

Fig. 4는 흡기온도가 20℃이고 엔진의 부하가 10, 20, 30Nm 인 경우의 예혼합율에 대한 연료소비율과 HC 배출량을 나타낸 것이다. 엔진의 부하가 10Nm인 경우, 예혼합율이 증가할수록 예혼합된 가솔린 연료의 착화원이 되는 디젤연료의 양이 적어짐으로 인하여 연료소비율은 상당히 악화되는 경향을 나타내고 있으며, 이는 예혼합율이 증가할수록 증가하는 HC 배출량으로 확인할 수 있다. 그러나 엔진의 부하를 20Nm로 증가시킨 경우에는 예혼합율의 증가에 따른 연료소비율과 HC 배출량이 그다지 악화되지 않는 경향을 볼 수 있으며 이는 엔진의 부하의 증가에 따라 연소실에 공급된 가솔린 연료 및 디젤 연료의 당량비가 상승한 결과로 볼 수 있다. 또한 엔진의

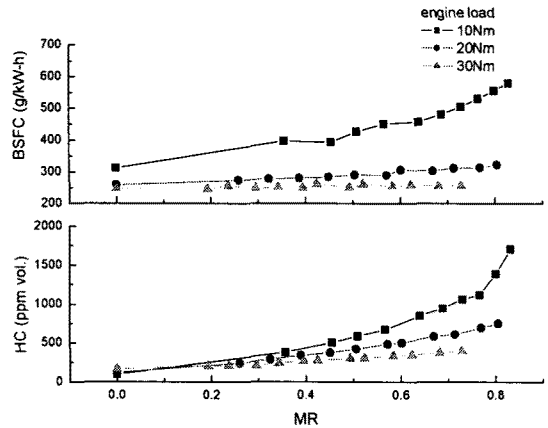


Fig. 4 Dependence of BSFC on HC emission ($T_{in}=20^{\circ}\text{C}$)

부하가 30Nm인 경우는 예혼합 비율을 증가시켜도 엔진의 연료소비량은 증가하지 않으며 HC 배출량도 부하가 10Nm인 경우에 비하여 전체적으로 상당히 감소함을 알 수 있다. 따라서, 낮은 예혼합율의 경우에는 예혼합된 가솔린 연료의 공연비가 낮지만 예혼합 연료의 착화원이 되는 디젤 연료의 양이 충분하여 예혼합 연료의 착화가 촉진된 것으로 판단되며, 높은 예혼합율의 경우에는 디젤 연료의 양이 상당히 감소하여도, 예혼합 가솔린 연료가 자발화 하기에 충분한 당량비에 도달하였음을 알 수 있다.

Fig. 5는 흡기 온도의 변화에 대한 NOx 발생량의 변화를 나타낸 것으로 예혼합율이 증가할수록 연소실 전체에서의 균일 예혼합 연소가 증가함에 따라 NOx의 발생량은 감소하는 경향을 보이며, 연소실 전체에 걸친 공연비가 낮은 저부하 영역에서는 예혼합율을 증가시켰을 경우에 NOx의 발생량은 거의 0ppm 수준까지 감소하는 경향

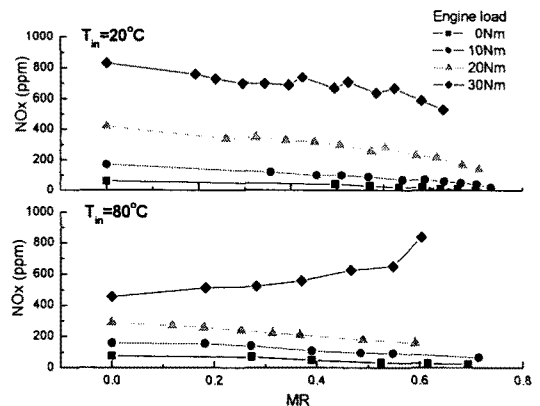


Fig. 5 Effect of intake air temperature on NOx emission

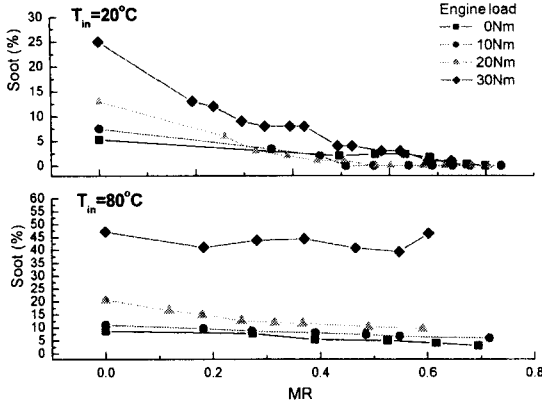


Fig. 6 Effect of intake air temperature on soot emission

을 나타내었다. 흡기온도를 80°C로 가열한 경우, 저부하 영역에서는 예혼합율을 증가시킬수록 NOx 발생량은 감소하였으나, 엔진의 부하가 30Nm인 경우는 예혼합율을 증가시킬수록 NOx의 발생량은 증가하였으며, 이것은 흡기의 가열로 인하여 예혼합 가솔린 연료의 착화가 피스톤의 상사점 이전으로 진각되어 전체적인 연소실 압력과 온도가 상승한 원인으로 판단된다.

Fig. 6은 흡기온도가 각각 20°C와 80°C인 경우의 부하 부하변동에 따른 HCCI 디젤 엔진의 soot 배출 특성을 나타낸 것이다. 흡기온도가 20°C인 경우, 예혼합율이 증가할수록 soot의 발생량은 급격히 감소하는 것을 알 수 있으며 이는 예혼합 가솔린 연료에 의하여 연소실 전체에 걸친 균일 연소가 일어나고 디젤 연료의 확산연소 구간이 줄어들기 때문인 것으로 보이며, 기존의 연구 결과들[6,7,8]과 잘 일치하는 경향을 보인다.

흡기 온도가 80°C인 경우, 저부하 영역에서의 soot의 발생량은 전체적으로 낮게 나타났으며 예혼합에 의하여 그 발생량이 대체적으로 감소하는 경향을 보였으나 부하가 30Nm인 경우는 그 soot의 발생량이 매우 컸으며 예혼합율이 증가하여도 그 발생량이 줄어들지 않았다. 이는 흡기를 가열할 경우 앞에서 언급한 바와 같이 흡기 효율의 저하에 의한 행정당 공기 흡입량의 저하에 의하여 연소실내의 전체적인 공연비가 상승하여 상대적으로 높은 당량비를 가지는 고부하 영역에서의 soot의 발생량이 증가한 원인과, 흡기 가열에 의하여 예혼합 가솔린 연료의 예혼합 연소의 발생시점이 디젤 연료의 연소시점보다 선행하여 디젤 연료의 연소에 필요한 산소를 감소시킨 원인이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다.

Fig. 7과 8은 부하가 10Nm인 경우의 흡기 온

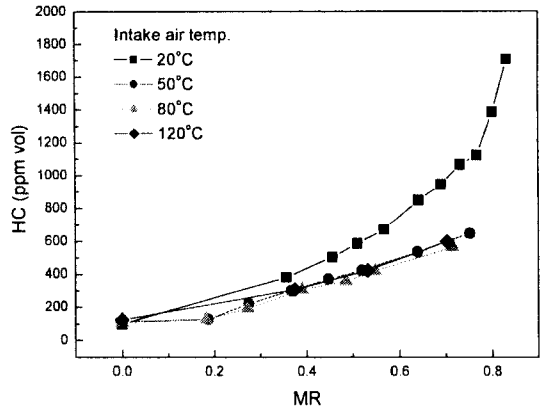


Fig. 7 Effect of intake air temperature and premixed ratio on the HC emissions at 10Nm load

도 변화에 따른 HC와 CO의 배출량을 나타낸 것이다. 흡기 온도가 20°C인 경우, 예혼합율이 증가할수록 예혼합 가솔린 연료의 실화에 의해 HC의 발생량이 증가하는 경향을 볼 수 있으나, 흡기 온도를 50°C 이상으로 가열한 경우에는 HC 배출량의 증가폭이 감소하였으며 이는 앞서서 언급한 바와 같이 흡기 가열에 의하여 예혼합기의 착화가 촉진된 원인인 것으로 보인다. Fig. 8의 CO 발생을 또한 HC 배출특성과 마찬가지로 예혼합율이 증가할수록 커지는 경향을 보였으나, 흡기 온도 조건의 변화에 따라서는 크게 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다.

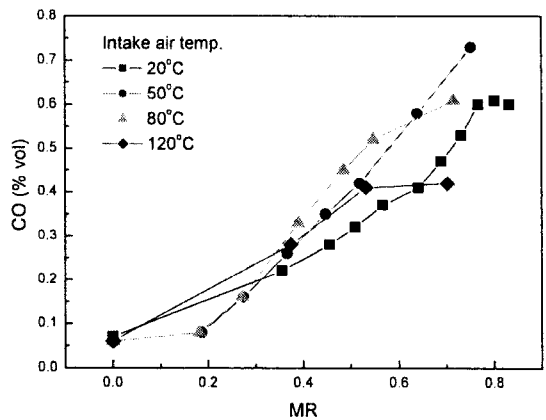


Fig. 8 Effect of intake air temperature and premixed ratio on the CO emissions at 10Nm load

4. 결론

가솔린 예혼합 압축 착화 디젤 엔진의 예혼합 조건 변화에 따른 연소 및 배기 특성을 연구한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 흡기 가열 효과로 저 부하영역에서 예혼합기의 착화성 증대로 연료소비율이 개선되었으나, 고부하 영역에서는 예혼합 연료의 조기 착화로 인해 오히려 연료소비율이 악화되는 결과를 나타내었다.
- 2) 흡기 온도가 20℃인 경우에는 예혼합 가솔린 연료의 연소는 디젤 연료의 예혼합 연소 이후에 나타났으나, 흡기 온도를 80℃로 가열한 경우에는 예혼합 가솔린 착화가 진각되어 디젤 연료의 연소보다 선행되는 것으로 나타났으며, 이는 흡기 가열에 의하여 흡기 효율이 감소하여 연소실 전체의 당량비가 증가한 원인과 연소실 온도 상승에 의한 원인이 복합적으로 작용한 것으로 보인다.
- 3) 높은 예혼합을 구간에서는 예혼합 연료의 착화원이 되는 디젤 연료의 양이 감소하여 HCCI 디젤 엔진의 운전 영역이 제한을 받았다.
- 4) NO_x의 발생량은 흡기온도가 20℃인 경우는 예혼합율의 증가와 함께 모든 부하조건에서 감소하였으나, 흡기 온도가 80℃이고 엔진의 부하가 30Nm인 경우에는 예혼합 연료의 조기착화에 의한 연소실내 압력 및 온도 상승에 의하여 예혼합율이 증가할수록 오히려 NO_x의 발생량은 증가하는 것으로 나타났다.
- 5) 흡기 온도가 20℃인 경우 soot의 발생량은 예혼합율의 증가와 함께 급격히 감소하여 예혼합율 0.8에서는 거의 발생하지 않았으나, 흡기 온도를 가열한 경우, 고부하 영역에서의 soot 발생량은 악화되는 것으로 보인다.
- 6) 예혼합율의 증가에 따라 HC 및 CO 배출량은 증가하였으나, 흡기 온도의 증가에 따라 HC의 배출량은 감소하였다.

후 기

본 연구는 청정생산기술사업(99-1-K-93)의 연구 지원에 의하여 수행된 연구의 일부로써 연구를 지원하여 주신 관계 기관에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] Rudolf H. Stanglmaier and Charles E. Roberts, "Homogeneous Charge Compression

Ignition (HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications", SAE paper No. 1999-01-3682, 1999.

[2] Masahiro Furutani, Yasuhiko Ohta, Masaaki Kono and Mamoru Hasegawa, "An Ultra-Lean Premixed Compression-Ignition Engine Concept and its Characteristics", The Fourth International Symposium COMODIA 98, 1998.

[3] Koji Yoshida, Hideo Shoji and Hidenri Tanaka, "Engine Performance of Lean Methanol-Air Mixture Ignited by Diesel Fuel Injection Applied with Internal EGR", SAE paper No. 2000-01-2012, 2000.

[4] Rudolf H. Stanglmaier, Thomas W. Ryan III and Jason S. Souder, "HCCI Operation of a Dual-Fuel Nature Gas Engine for Improved Fuel Efficiency and Ultra-low NO_x Emissions at Low to Moderate Engine Loads", SAE paper No. 2001-01-1897, pp. 1036~1042, 2001.

[5] Tatsuhito Kaimai, Hideyuki Tsunemoto and Hiromi Ishitani, "Effects of a Hybrid Fuel System with Diesel and Premixed DME/Methane Charge on Exhaust Emissions in a Small DI Diesel Engine", SAE paper No. 1999-01-1509, 1999.

[6] Chang Sik Lee, Ki Hyung Lee, Dae Sik Kim, Si Woong Jang, "Combustion Characteristics of Homogeneous Charge Combustion Diesel Engine with Load Condition", Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 10, No. 2, p.9, 2002.

[7] Dae Sik Kim, Ki Hyung Lee, Chang Sik Lee, "Experimental and Numerical Study on the Compression Characteristics of a Premixed Charge Compression Ignition Engine", Proceedings of the 2002 Fall Technical Conference(ASME), ICE-Vol. 39, pp. 89~96, 2002.

[8] Chang Sik Lee, Ki Hyung Lee and Dae Sik Kim, "Experimental and Numerical Study on the Combustion Characteristics of Partially Premixed Charge Compression Ignition Engine with Dual Fuel", Fuel, Vol. 82, No. 5, pp. 553~560, 2003.